

Тип статьи: научная
УДК 62-233.132
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-121-129

РЕМОНТ КОРЕННЫХ И ШАТУННЫХ ШЕЕК КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ ДИСКРЕТНОГО УПРОЧНЕНИЯ

*Дмитрий Владимирович Доровских*¹, *Юрий Евгеньевич Глазков*²,
*Никита Алексеевич Шуваев*³

^{1,2,3} Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация
¹dima.dorovskikh@yandex.ru, ²glazkov_yural@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Владимирович Доровских,
dima.dorovskikh@yandex.ru

Corresponding author: Dmitry Dorovskikh, dima.dorovskikh@yandex.ru

Реферат. Выполнены исследования по оценке влияния дискретного упрочнения шеек коленчатого вала на его усталостную прочность. Для этого были проведены испытания на усталость двух контрольных частей коленчатого вала типа Д80. Установлено, что разрушение контрольной части №1 произошло после 322000 циклов, контрольной части №2 - после 201000 циклов. Зона разрушения обеих контрольных частей проходит по переходной галтели R8 мм шатунных шеек. Это позволяет сделать вывод, что фактор дискретного упрочнения не связан с усталостным разрушением контрольных частей. С целью определения ресурса коленвала двигателя КамАЗ-740, упрочненного дискретным способом (вал четвертого ремонтного размера), он был установлен на автомобиль КамАЗ-5320. В результате проведенных испытаний было установлено, что за весь цикл тестирования пробег автомобиля составил 109000 км. При этом на момент завершения испытаний все параметры двигателя автомобиля соответствовали техническим требованиям. Автомобиль КамАЗ-5320 находится в эксплуатации до настоящего времени. Его пробег составил 269000 км без остановки на капитальный ремонт. Для проведения эксплуатационных испытаний чугунового коленчатого вала с дискретным упрочнением, двигателя типа Д80, был взят двигатель дизель - генератора 1Д80Б, который после сборки подвергли полномасштабным испытаниям. Данные испытания включали в себя 100-часовую обкатку двигателя, определение уровня вибрации и амплитуд крутильных колебаний валопровода дизель - генератора в рабочем диапазоне оборотов. Проведенный анализ вибрационного состояния двигателя показал, что на всех режимах испытаний уровень вибрации в исследуемых точках не превышает норм (0,350 мм на корпусе турбокомпрессора и 0,150 мм на лапе генератора). Максимальные напряжения от крутильных колебаний составили: 8 порядок - 17,5 МПа; 4, 5 порядок - 10,5 МПа; 1, 5 порядок - 10,0 МПа. Полученные уровни напряжений значительно ниже допустимых. Проведенные испытания дизель-генератора 1Д80Б показали полное его соответствие техническим требованиям на эксплуатацию данного двигателя.

Ключевые слова: дизель, ремонт, коленчатый вал, дискретное упрочнение, испытания.

REPAIR OF MAIN AND CONNECTING ROD JINS OF DIESEL ENGINE CRANKSHAFTS USING DISCRETE HARDENING

¹Dmitriy Dorovskikh, ²Yurij Glazkov, ³Nikita Shuvaev

^{1,2,3} Tambov state technical university, Tambov, Russia

¹dima.dorovskikh@yandex.ru, ²glazkov_yural@mail.ru

Abstract. Studies to assess the effect of discrete hardening of the crankshaft journals on its fatigue strength have been carried out. For this purpose, fatigue tests were carried out on two control parts of the D80 type crankshaft. It was established that the destruction of control part No. 1 occurred after 322,000 cycles, control part No. 2 after 201,000 cycles. The destruction zone of both control parts passes

along the R8 mm transition fillet of the connecting rod journals. This allows us to conclude that the discrete hardening factor is not associated with fatigue failure of the control parts. In order to determine the service life of the crankshaft of the KamAZ 740 engine, strengthened in a discrete way (shaft of the fourth repair size), it was installed on a KamAZ 5320 vehicle. As a result of the tests, it was found that during the entire testing cycle the vehicle's mileage was 109,000 km. Moreover, at the time of completion of the tests, all parameters of the car's engine met the technical requirements. The KamAZ 5320 vehicle is in operation to this day. Its mileage was 269,000 km without stopping for major repairs. To conduct operational tests of a cast iron crankshaft with discrete hardening of a D80 type engine, a 1D80B diesel generator engine was taken, which after assembly was subjected to full-scale testing. These tests included a 100-hour engine run-in, determination of the vibration level and amplitudes of torsional vibrations of the diesel generator shaft line in the operating speed range. The analysis of the vibration state of the engine showed that in all test modes the vibration level at the points under study does not exceed the norms (0.350 mm on the turbocharger housing and 0.150 mm on the generator foot). The maximum stresses from torsional vibrations were: 8, about 17.5 MPa; 4, 5 order 10.5 MPa; 1.5 order 10.0 MPa. The resulting stress levels are significantly lower than permissible. Tests of the 1D80B diesel generator showed its full compliance with the technical requirements for the operation of this engine.

Keywords: diesel, repair, crankshaft, discrete hardening, testing.

Для цитирования: Доровских Д.В., Глазков Ю.Е., Шуваев Н.А. Ремонт коренных и шатунных шеек коленчатых валов дизельных двигателей при помощи дискретного упрочнения // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 68, № 2. С. 121-129. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-121-129>.

For citation: Dorovskikh D., Glazkov Yu., Shuvaev N. Repair of main and connecting rod jins of diesel engine crankshafts using discrete hardening. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 68(2): 121-129. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-121-129>.

Введение. Выбор материалов традиционной номенклатуры при изготовлении и ремонте контактирующих пар кривошипно-шатунного механизма дизельных двигателей может оказаться малоэффективным. Повышение требований к эксплуатационным характеристикам деталей агрегатов и узлов накладывают ограничения при проведении их ремонта.

Способы упрочнения, применяемые при ремонте коренных и шатунных шеек коленвалов имеют следующие недостатки[1]:

- известные способы упрочнения и нанесения износостойких покрытий могут не обеспечивать одновременно требуемой износостойкости и усталостной прочности деталей;
- не обеспечивается качественное сцепление упрочняющего покрытия с восстанавливаемой деталью;
- высокая энергоемкость процесса упрочнения;
- возникновение деформации восстанавливаемой детали после упрочнения, что требует увеличения величины припусков под механическую обработку;
- организация производственного процесса требует значительных капитальных затрат и устранения вредного воздействия на окружающую среду.

Таким образом, известные способы упрочнения имеют ограничения, что не позволяет получить удовлетворительный уровень эксплуатационных характеристик восстановленных деталей в сочетании с достаточной технологичностью и экономичностью процессов ремонта.

В последние десятилетия развиваются новые способы восстановления, которые способствуют повышению прочностных характеристик и износостойкости отремонтированных деталей.

Метод электроискрового легирования является одним из перспективных. Его сущность заключается в переносе металла в момент искрового разряда с анода на катод. При переносе металла в момент разряда, так же происходит макролегирование поверхностной зоны детали. Это способствует изменению физико-механических свойств и химического состава материала восстанавливаемой детали в области пятна контакта с электродом.

Процесс электроискрового легирования имеет ряд особенностей[2]:

- перенос материала зависит от эрозионной стойкости анода и катода;

- ограничения по глубине и толщине легированного слоя;
- возможно образование каверн и других дефектов на поверхности;
- шероховатость поверхности, после обработки, может не соответствовать требованиям;
- высокая трудоемкость процесса.

Ввиду указанных особенностей, электроискровое легирование имеет узкую область применения. Чаще всего там, где нет высоких требований к качеству поверхности и износостойкости[3].

Материалы и методы.

С целью технологической адаптации способа дискретного упрочнения шеек коленчатых валов двигателей типа Д80, 5Д49, КамАЗ-740 и определения влияния масштабного фактора на качество упрочнения были выполнены дополнительные исследования.

Для этого были проведены испытания на усталость двух отдельных (контрольных) частей коленчатого вала типа Д80, которые были вырезаны из целого образца вала. Контрольная часть №1, с коренными шейками 8, 9, 10, 11 и шатунными шейками 8, 9, 10. Контрольная часть №2, с коренными шейками 4, 5, 6, 7 и шатунными 4, 5, 6. Коренные и шатунные шейки этих частей были упрочнены дискретным способом. Было проведено чистовое шлифование, восстановление масляных отверстий и полирование. Это обеспечило шероховатость рабочей поверхности шеек в пределе $Ra=0,32-0,16$ мкм в соответствии с требованиями рабочего чертежа.

Режимы дискретного упрочнения шеек контрольных частей соответствовали оптимальным, которые были определены при проведении лабораторных испытаний:

- ток разряда $I_p = 60-70$ А;
- дискретности $\varphi = 50\%-70\%$;
- толщина электрода (сталь 08Х18Н10Т) $S = 1,0$ мм.

Проведенные затем исследования упрочненных зон на шейках показали, что:

- глубина упрочнения $0,24-0,38$ мм;
- твердость упрочненной зоны (пятна) $580-680$ HV ($53,1-58,4$ HRC);
- твердость сердцевины (основного металла) $250-300$ HV ($22,1-30,2$ HRC).

Испытания контрольных частей на усталость проводились в ООО ПП «Дизельмаш», г. Мытищи. Для этого была использована универсальная испытательная машина МУП-100. Воздействие циклических нагрузений прикладывалось к шатунным шейкам 9 (контрольная часть №1) и 5 (контрольная часть №2). Проведенное тензометрирование показало, что величина максимального нагружения - 23 МПа, коэффициент асимметрии составил $R = 0,31$.

Начало разрушения контрольных частей было установлено для:

- контрольной части №1 - после 322000 циклов;
- контрольной части №2 - после 201000 циклов.

Эти параметры соответствуют нагрузке в 21 МПа, для более мощного дизеля 10Д100 при [4,5]. Зона разрушения обеих контрольных частей проходит по переходной галтели R8 мм шатунных шеек. Это позволяет сделать вывод, что фактор дискретного упрочнения не связан с усталостным разрушением контрольных частей.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что предлагаемое упрочнение деталей не является влияющим фактором, который приводит к снижению усталостной прочности. Предлагаемую технологию можно рекомендовать для дальнейшей апробации ремонта коленвалов.

Для внедрения технологического процесса дискретного упрочнения шеек коленчатых валов двигателей типа Д80 на ООО ПП «Дизельмаш» была разработана соответствующая технологическая оснастка. Дискретное упрочнение шеек коленчатых валов производилось на станке модели РТ 11 (Рисунок 1) после предварительного шлифования.

По завершению дискретного упрочнения и выполнения всех последующих операций шейки коленчатого вала имели следующие параметры:

- зоны, образованные дискретным упрочнением, как в осевом, так и радиальном сечениях представляют собой дискретные участки различной конфигурации (дугообразные, либо прямолинейные или волнистые), в структуре этих зон четко выделяется три зоны (Рисунок 2);
- «белый» слой, практически не травящийся, расположен непосредственно у поверхности шейки и имеет глубину $0,20-0,32$ мм;

- зона «термического» влияния, расположена в сечении шейки непосредственно вслед за «белым» слоем, повторяя его конфигурацию. Характер дисперсности структуры в этой зоне отличается от дисперсности основной перлитной структуры, глубина зоны «термовлияния» составляет 0,06-0,08 мм;
- твердость основного материала составляет 215-300 HV (24-30,2 HRC), «белого» слоя 480-680 HV (46-57 HRC) и зоны «термического» влияния 400-430 HV (40,5-42,9 HRC);
- визуальный осмотр упрочненных поверхностей шеек показал отсутствие дефектов и трещин.

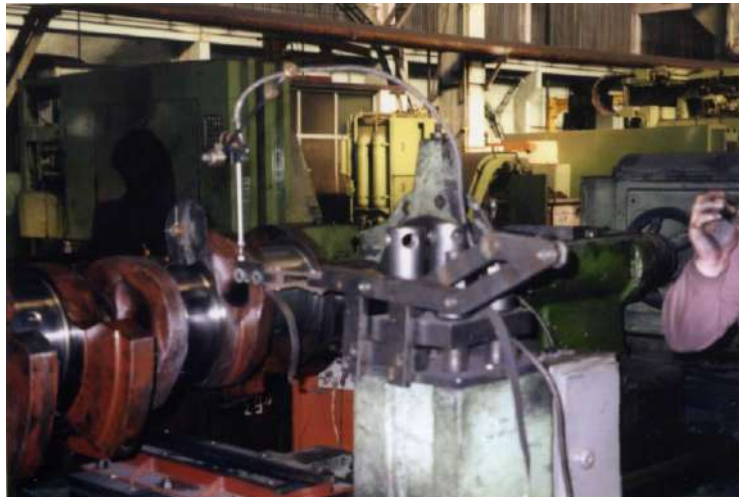
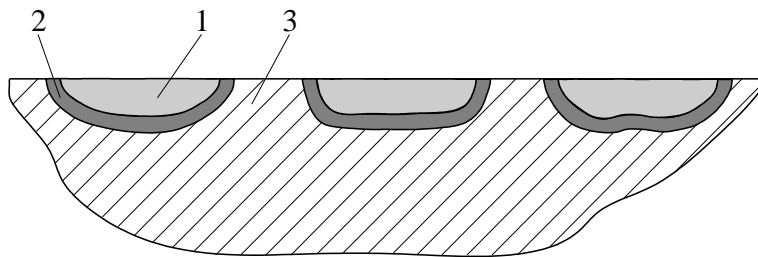


Рисунок 1 - Дискретное упрочнение коленвала двигателя типа Д80

С целью внедрения технологического процесса дискретного упрочнения шеек коленчатых валов двигателя КамАЗ-740, в ООО «4 Такта-Т» г. Тамбов были проведены опытные работы по определению припуска под чистовую шлифовку, выбору оборудования для упрочнения и разработке технологической оснастки.



1 – «белый» слой; 2 – зона термического влияния; 3 – основной материал

Рисунок 2 - Схема упрочненных зон

Для проведения испытаний был выбран коленвал четвертого ремонтного размера, который был отбракован и не подлежал восстановлению традиционными способами.

Работы выполнялись на токарном станке модели ДИП-500 с предварительной шлифовкой шеек коленвала (Рисунок 3). Было выполнено упрочнение предлагаемым способом, и все последующие операции, предусмотренные технологическим процессом ремонта.

Твердость упрочненных зон (пятен) составила:

- на рабочих поверхностях шеек 660-860 HV (57,5-65,8 HRC);
- сердцевины вала (основного металла) 380-450 HV (38,9-44,5 HRC).



Рисунок 3 - Дискретное упрочнение коленвала двигателя КамАЗ-740

Для определения влияния технологии дискретного упрочнения на детали изготовленные из стали 38 ХНЗМА (ГОСТ 4543-71), в ООО ПП «Дизельмаш» были проведены опытные работы по упрочнению коленчатых валов двигателей типа 5Д49 [6]. Эти двигатели изготавливаются АО «Коломенский завод» МО г. Коломна, при чем шейки коленчатых валов подвергаются азотированию на глубину 0,4 мм, согласно требованиям рабочего чертежа.

При поступлении данного двигателя на капитальный ремонт установлено, что после шлифования шеек коленчатого вала под второй (третий) ремонтный размер практически отсутствует упрочненный (азотированный) слой. Поэтому, для продления срока эксплуатации двигателя 5Д49 предлагается при ремонте вместо азотирования применять дискретное упрочнение шеек коленчатого вала.

Результаты и обсуждение.

С целью определения ресурса коленвала двигателя КамАЗ-740, упрочненного дискретным способом (вал четвертого ремонтного размера), он был установлен на автомобиль КамАЗ-5320. В течение периода эксплуатации автомобиль проходил все ТО согласно техническим требованиям на данный двигатель. В результате проведенных испытаний было установлено, что за весь цикл тестирования пробег автомобиля составил 109000 км. При этом на момент завершения испытаний все параметры двигателя автомобиля соответствовали техническим требованиям.

Автомобиль КамАЗ-5320 находится в эксплуатации до настоящего времени. Его пробег на 20.12.23 г. составил 269000 км (без остановки на капитальный ремонт).

Для проведения эксплуатационных испытаний чугунного коленчатого вала с дискретным упрочнением, двигателя типа Д80, был взят двигатель дизель - генератора 1Д80Б, который после сборки подвергли полномасштабным испытаниям в ООО ПП «Дизельмаш».

Данные испытания включали в себя 100-часовую обкатку двигателя, определение уровня вибрации и амплитуд крутильных колебаний валопровода дизель - генератора в рабочем диапазоне оборотов.

Замер амплитуды вибрации производился ручным вибрографом ВР-1А в вертикальном, поперечном и осевом направлениях. Обработка виброграмм производилась с помощью отсечного микроскопа МПВ-2 с 24 кратным увеличением. Амплитуда вибрации определялась при работе двигателя под нагрузкой на режимах тепловозной характеристики, соответствующих 8...15 позициям контроллера, в следующих точках:

- на лапе генератора;
- на корпусе турбокомпрессора на уровне оси ротора.

Проведенный анализ вибрационного состояния двигателя при его работе на режимах тепловозной характеристики показал, что на всех режимах испытаний уровень вибрации в

исследуемых точках не превышает норм (0,350 мм на корпусе турбокомпрессора и 0,150 мм на лапе генератора) (Таблица 1).

Таблица 1 - Максимальная амплитуда вибрации дизель - генератора 1Д80Б

№ п/п	Позиция контроллера машиниста	Частота вращения коленвала n , мин ⁻¹	Мощность N , кВт	Амплитуда вибрации, мм					
				на корпусе турбокомпрессора на уровне оси ротора			на лапе генератора		
				вертикальная	осевая	поперечная	вертикальная	осевая	поперечная
1	8	675	1080	0,122	0,135	0,193	0,102	0,050	0,143
2	9	720	1220	0,168	0,122	0,100	0,072	0,064	0,127
3	10	770	1380	0,168	0,122	0,110	0,068	0,053	0,088
4	11	815	1540	0,114	0,102	0,143	0,072	0,052	0,093
5	12	860	1685	0,214	0,143	0,110	0,050	0,043	0,093
6	13	910	1850	0,227	0,164	0,147	0,072	0,047	0,093
7	14	955	1965	0,252	0,193	0,106	0,085	0,043	0,077
8	15	1000	2075	0,343	0,239	0,135	0,072	0,052	0,097
Норма				0,350	0,350	0,350	0,150	0,150	0,150

Максимальная величина вибрации наблюдалась на корпусе турбокомпрессора в вертикальном направлении при работе двигателя на режиме полной мощности и составила 0,343 мм, что не превышает установленной нормы (0,350 мм).

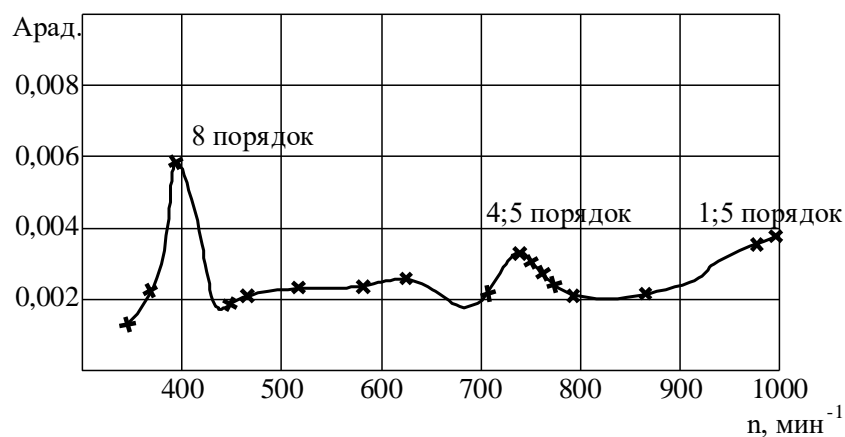
На лапе генератора в поперечном направлении наибольший уровень вибрации (0,143 мм) был зафиксирован на 8 позиции контроллера машиниста ($n=875$ мин⁻¹ и $N=1080$ кВт), что не превышает установленной нормы - 0,150 мм.

Испытания по определению амплитуды крутильных колебаний валопровода двигателя в рабочем диапазоне оборотов проводились осциллографическим методом с помощью торсиографа ТРАК-12м. Торсиографирование проводилось при непрерывном плавном изменении частоты вращения коленчатого вала при работе двигателя на холостом ходу и под нагрузкой на режимах тепловозной характеристики.

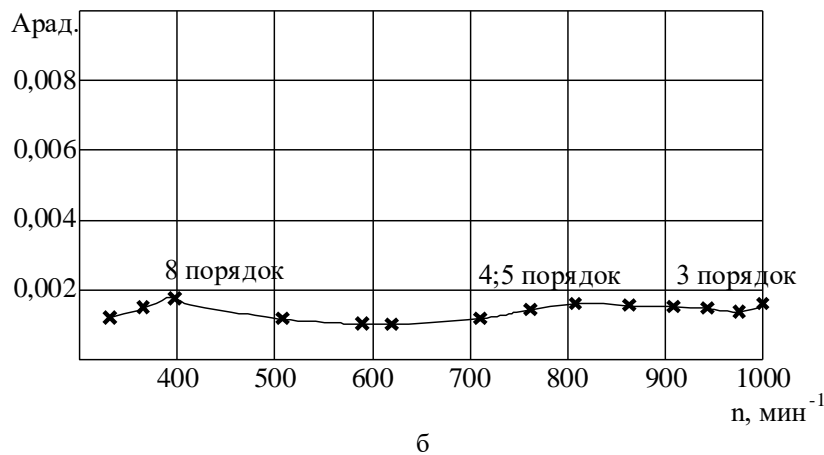
В процессе испытаний, осциллографом АКПП-4122/12 одновременно регистрировались:

- торсиограмма;
- отметки оборотов коленчатого вала;
- отметки времени 0,02 сек.

Результаты испытаний представлены в виде зависимостей (Рисунок 4).



а



а – под нагрузкой; б – холостой ход.

Рисунок 4 - Резонансные кривые крутильных колебаний переднего носка коленчатого вала

Согласно полученным результатам установлено, что при работе двигателя под нагрузкой на режимах тепловозной характеристики в рабочем диапазоне оборотов двигателя проявляются крутильные колебания коленчатого вала 4, 5 порядка с максимальными амплитудами 0,0036 рад. при 740 мин⁻¹, 8 порядка с максимальными амплитудами 0,006 рад. при 400 мин⁻¹, в зоне оборотов, близких к номинальным (900...1000 мин⁻¹) проявляются колебания 1, 5 порядка с максимальными амплитудами до 0,0035 рад. при n = 1000 мин⁻¹.

Максимальные амплитуды крутильных колебаний коленчатого вала при работе двигателя на холостом ходу оказались значительно ниже и не превышают 0,002 рад.

По расчетной формуле крутильных колебаний и полученным при торсиографировании амплитудам колебаний были определены напряжения в опасном сечении валопровода (8 шатунной шейки) по формуле (1).

$$\tau_{k1k+1} = \frac{A_1(\alpha_k - \alpha_{k+1})}{\varepsilon_{k1k+1} \cdot I_0 \cdot W_{k1k+1}}, \quad (1)$$

где τ_{k1k+1} - напряжение в опасном сочетании;

A_1 - амплитуда колебаний зафиксированная торсиграфом, рад;

$\alpha_k - \alpha_{k+1}$ - максимальная разность амплитуд колебания в относительных единицах;

ε_{k1k+1} - податливость колена в относительных единицах;

I_0 - податливость колена;

W_{k1k+1} - момент сопротивления сечения шатунной шейки.

Таким образом, максимальные напряжения от крутильных колебаний составили:

8 порядок - 17,5 МПа;

4, 5 порядок - 10,5 МПа;

1, 5 порядок - 10,0 МПа.

Данные уровни напряжений значительно ниже допустимых, которые составляют:

- для режима работы дизель-генератора при n = 400 мин⁻¹, на котором, проявляются колебания 8 порядка $\tau_{доп} = 34,0$ МПа;

- для режима n = 740 мин⁻¹ при колебаниях 4, 5 порядка $\tau_{доп} = 29,0$ МПа;

- для номинального режима n = 1000 мин⁻¹ при колебаниях 1, 5 порядка $\tau_{доп} = 25,5$ МПа.

Установлено, что уровень напряжений в коленчатом вале, полученный при торсиографировании дизель-генератора 1Д80Б, не превышает уровень однотипных с ним дизель-генераторов Д70, опыт эксплуатации которых показал достаточную, с точки зрения крутильных колебаний, надежность их валопроводов.

Таким образом, полномасштабные заводские испытания дизель-генератора 1Д80Б, оснащенного коленчатым валом с дискретным упрочнением, показали полное его соответствие техническим требованиям на эксплуатацию данного двигателя.

После завершения заводских испытаний двигатель 1Д80Б был установлен на тепловоз и направлен в эксплуатацию. При этом на 28.11.2023 г., согласно карте испытаний, после пробега тепловоза 100000 км двигатель был, подвергнут полной дефектации. Обмер коленчатого вала показал, что он находится в рабочем состоянии и износ по коренным и шатунным шейкам отсутствует. После завершения дефектации и замены изношенных деталей двигатель был установлен на тепловоз и отправлен для дальнейшей эксплуатации.

Выводы.

1. Восстановление размеров шеек коленчатого вала дискретным упрочнением не приводит к снижению усталостной прочности. Поэтому, данная технология может быть рекомендована вместо нормализации и закалки ТВЧ шеек коленвала двигателя типа Д80. При этом полученный максимальный уровень вибрации на корпусе турбокомпрессора в вертикальном направлении не превышает установленной нормы для двигателей типа Д80.

2. Установлено, что дискретное упрочнение обеспечивает упрочненный слой (в пятне) глубиной 240-380 мкм твердостью в пределах 580-680 HV (53,1-58,4 HRC);

3. Шейки коленчатых валов изготовленных из чугуна, после восстановления, имеют достаточную усталостную прочность на уровне $\sigma^{-1} \approx 195$ МПа. При этом фактор дискретного упрочнения не связан с усталостным разрушением контрольных частей, т.к. разрушение происходит по галтели R8 мм шатунных шеек;

4. Дискретное упрочнение оказывает минимальное влияние на вибрационную нагрузку, амплитуда которой во время испытаний на всех режимах не превышала 0,343мм, что находится в пределах установленной нормы (0,350 мм);

5. Установлено, что наибольшие напряжения от крутильных колебаний в коленчатом вале после дискретного упрочнения ниже допустимых в 1,8-2,4 раза.

Список источников

1. Восстановление и упрочнение изношенных деталей автомобилей нанокompозиционными гальваническими покрытиями / А. Н. Новиков, Е. В. Агеева, М. А. Зубарев, А. С. Осминина. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2018. – 160 с. – ISBN 978-5-907049-68-0. – EDN XUZWYP.

2. Верхотуров, А. Д. Физико-химические основы процесса электроискрового легирования металлических поверхностей / А. Д. Верхотуров. – Владивосток: Дальнаука, 1992. – 180 с. – ISBN 5-7442-0338-9. – EDN SQLNFD.

3. Глушко, С. П. Исследование технологии электроискрового нанесения покрытий, легирования и упрочнения / С. П. Глушко // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 253-259. – DOI 10.23947/2687-1653-2021-21-3-253-259. – EDN AIFVXK.

4. Горский, В. Г. Планирование эксперимента в системах контроля качества / В. Г. Горский, Ю. П. Адлер // Методы менеджмента качества. – 2019. – № 3. – С. 54-61. – EDN VVELOB.

5. Посметьев, В. И. Оценка эффективности перспективной комбинированной технологии для восстановления шеек коленчатых валов двигателей лесовозных автопоездов / В. И. Посметьев, А. М. Кадырметов, В. О. Никонов // Воронежский научно-технический Вестник. – 2021. – Т. 4, № 4(38). – С. 86-101. – DOI 10.34220/2311-8873-2022-86-101. – EDN ПZXVM.

6. Тищенко, А. Т. Разработка системы моделей, методов и средств для обеспечения прочности коленчатых валов транспортных дизелей: специальность 01.02.06 "Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Тищенко Алексей Тимофеевич. – Москва, 1993. – 49 с. – EDN ZJUQNB.

References

1. Restoration and strengthening of worn car parts with nanocomposite galvanic coatings / A. N. Novikov, E. V. Ageeva, M. A. Zubarev, A. S. Osminina. – Kursk: Closed Joint Stock Company "University Book", 2018. – 160 p. – ISBN 978-5-907049-68-0. – EDN XUZWYP.

2. Verkhoturov, A. D. Physico-chemical foundations of the process of electrospark alloying of metal surfaces / A. D. Verkhoturov. – Vladivostok: Dalnauka, 1992. – 180 p. – ISBN 5-7442-0338-9. – EDN SQLNFD.
3. Glushko, S. P. Research on the technology of electrospark coating, alloying and hardening / S. P. Glushko // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2021. – Т. 21, No. 3. – P. 253-259. – DOI 10.23947/2687-1653-2021-21-3-253-259. – EDN AIFVXK.
4. Gorsky, V. G. Planning an experiment in quality control systems / V. G. Gorsky, Yu. P. Adler // Methods of quality management. – 2019. – No. 3. – P. 54-61. – EDN VVELOB.
5. Posmetyev, V. I. Assessing the effectiveness of a promising combined technology for restoring the crankshaft journals of engines of timber road trains / V. I. Posmetyev, A. M. Kadyrmetov, V. O. Nikonov // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2021. – Т. 4, No. 4(38). – P. 86-101. – DOI 10.34220/2311-8873-2022-86-101. – EDN IIZXVM.
6. Tishchenko, A. T. Development of a system of models, methods and means to ensure the strength of crankshafts of transport diesel engines: specialty 01.02.06 “Dynamics, strength of machines, instruments and equipment”: abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Tishchenko Alexey Timofeevich. – Moscow, 1993. – 49 p. – EDN ZJUQNB.

Информация об авторах

Д.В. Доровских – кандидат технических наук, доцент; Ю.Е. Глазков - кандидат технических наук, доцент; Н.А. Шуваев – магистрант.

Information about the authors

D. Dorovskikh - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; Yu. Glazkov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; N. Shuvaev - MEng student.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 10.03.2024 Принята к публикации (Accepted): 21.04.2024